

슬래밍衝擊을 받는 船體의 動的 應答解析*

—有限要素法으로—

洪奉基**·文德弘**·裴東明***

Analysis on the Dynamic Responce of the Hull Structure due to Slamming Impact*

—by Finite Element Method—

Bong-ki HONG**, Duk-hong MOON** and Dong-myung BAE***

In rough seas, actual behaviours of a ship may not be estimated by the linear strip theory, because of Nonlinearities due to the hull shape, bottom slamming and bottom and/or bow-flare slamming. In case of slamming, impulsive hydrodynamic pressure occurs on the fore body surface of the ship, resulting hull vibration called whipping, by which the ship may suffer from serious structural damages and the impact pressure, depends critically on the relative velocity at re-entry.

In this paper, the Time history of impact force at each station, the longitudinal distribution of impact force at critical time, the Time history of acceleration at F.P. and the Time history of Bending moment at midship are illustrated. That is, authors analyzed Dynamic response of container ship to be subjected slamming impact force.

記 號

U : 前進速度	N_H : 各斷面의 2次元 減衰係數 $\left(= \frac{\rho g^2}{\omega_e^2} \{ 2 \sin(\kappa b) \exp(-\kappa \cdot z_d) \}^2 \right)$
ζ : Heave의 振幅	κ : 波數
θ : Pitch의 振幅	z_d : 各斷面의 變化하는 吃水
Φ : 入射波의 速度 Potential(Head Sea)	b : 靜水中에서의 各斷面의 半幅
η : 波의 上下振幅	ρ : 海水의 密度
η_0 : 波의 上下最大振幅	A : 各斷面의 浸水面積
V_x : z 方向의 Orbital Velocity	s : Strip間의 距離
w : z 方向 變位	W : 船體全體의 重量
ω : 入射波의 周波數	T : 各斷面의 靜水中에서의 吃水
ω_e : 遭遇 周波數	h : 入射波의 波高
M_H : 各斷面의 2次元 附加質量 $\left(= \frac{1}{2} \rho \pi b^2 \right)$	λ : 入射波의 波長
	g : 重量加速度

* 이 論文은 1982년도 문교부 학술연구조성비에 의해 연구되었음.

**釜山水產大學: National Fisheries University of Busan

***釜山大學校: Busan National University

2. T190型 磁氣컴퍼스는 T165型 磁氣컴퍼스에 比하여 全 水平磁場 範圍에서 周期는 길었으며, 振幅은 0.08Gauss 以上에서는 크고, 그 以下에서는 작은 경향을 보였다.

3. 水平磁場이 強할수록 周期와 磁氣子午線에 復歸하는 時間은 짧아지고, 振幅과 過行角은 커졌으며, 制振曲線의 主要點까지의 經過時間(T_i)은 水平磁場(H)의 -0.65 乘에 比例하였고, 過行角(ρ_i)은 0.18 乘에 比例하였다.

文 獻

1. G. D. Dunlap and H. H. Shufeldt(1969): Dutton's Navigation and Piloting. United States Naval institute, 130-175.
2. 石井正博·橋本勝(1977): 電子通信實習. 海文堂, 44-50.
3. 姜五佳(1980): 新版統計學. 博文社, 118-133.
4. 李鍾裕(1981): 航海計器 1. 亜成出版社, 103-125.
5. Nye S. Spencer and Gearge F. Kucera(1975): Handbook of Mugentic Compass Adjustment and Compensation. U. S. Navy Department Bureau of Ships, Washington D. C, 7-13.
6. 鈴木裕(1962): 船舶用 磁氣コンパスの性能改善に關する研究. 東京水産大學 特別研究報告6(3), 15-45.

슬래밍 충격을 받는 船體의 動的 應答解析

$$\eta = \eta_0 e^{\kappa x} \cos(\omega_e t + \kappa x') \dots\dots\dots(5)'$$

$$V_x = -\omega \eta_0 e^{\kappa x} \sin(\omega_e t + \kappa x') \dots\dots\dots(6)'$$

$$\omega_e = \omega + \kappa U \dots\dots\dots(7)$$

그리고, 運動方程式은 다음의 假定(4),(7)을 考慮하였다.

(i) 一般의 線型理論(스트립 理論)의 假定

(ii) 相對變位 計算에 Dynamic Swell-up에 의한 量은 無視

2. 運動方程式

(1) 運動方程式^{2),10),12)}

微小變位를 假定하고, Timoshenko의 1보理論을 修正해서 적용하면, Fig.2와 같은 보에 생기는 z方向의 全變位, 回轉角 및 x方向의 變位는 各各 다음式으로 주어진다.

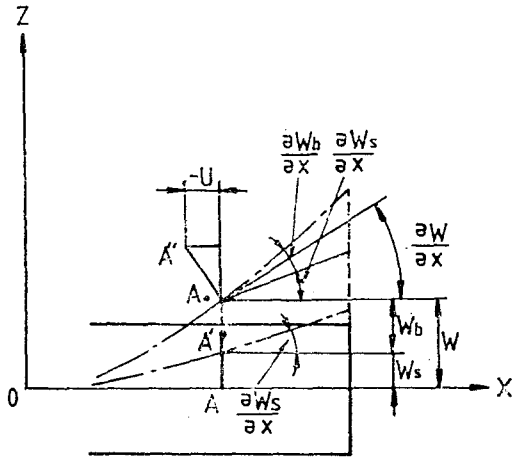


Fig. 2. Definition of shear and bending deflection.

$$w = w_b + w_s \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w_b}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial x} \dots\dots\dots(9)$$

$$u = -z \frac{\partial w_b}{\partial x} = -z \frac{\partial}{\partial x} (w - w_s) \dots\dots\dots(10)$$

또한, 變位-變形率의 關係式은

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2}{\partial x^2} (w - w_s) \dots\dots\dots(11)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = 0$$

$$\gamma_{xx} = \frac{\partial w_s}{\partial x}$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0$$

로 되고, 剪斷力과 굽힘모우멘트는 各各,

$$Q = GA_w \left(\frac{\partial w_s}{\partial x} + \eta_s \frac{\partial^2 w_s}{\partial t \partial x} \right) \dots\dots\dots(12)$$

$$M = -EI \left\{ \frac{\partial(w-w_s)}{\partial x} + \eta_b \frac{\partial^2(w-w_s)}{\partial t \partial x} \right\} \dots\dots(13)$$

로 된다. Fig.3과 같은 微小보에 作用하는 힘의 平衡關係에서,

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + f_z = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \dots\dots\dots(14)$$

$$-\frac{\partial M}{\partial x} + Q = J \frac{\partial^3(w-w_s)}{\partial t^2 \partial x} \dots\dots\dots(15)$$

이므로 運動方程式은 다음과 같다.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left\{ GA_w \left(\frac{\partial w_s}{\partial x} + \eta_s \frac{\partial^2 w_s}{\partial t \partial x} \right) \right\} + f_z = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \dots\dots(16)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ EI \left(\frac{\partial(w-w_s)}{\partial x} + \eta_b \frac{\partial^2(w-w_s)}{\partial t \partial x} \right) \right\} + GA_w \left(\frac{\partial w_s}{\partial x} + \eta_s \frac{\partial^2 w_s}{\partial t \partial x} \right) = J \frac{\partial^3(w-w_s)}{\partial t^2 \partial x} \dots\dots(17)$$

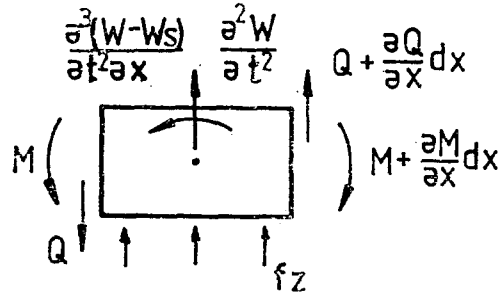


Fig. 3. Forces acting upon small beam element.

(2) 船體에 作用하는 힘⁴⁾

Fig.1에서, 船體重心에서 x만큼 떨어진 斷面에서 的 流體粒子의 鉛直速度는 $V = -\xi + x\theta - u\theta + V_x$ 가 되며, 그 船體斷面에 作用하는 힘의 성분은 다음과 같다.

i) 流體의 運動量 變化에 기인하는 힘:

$$f_m = \left(\frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x} \right) M_H V = M_H \frac{\partial V}{\partial t} - UV \frac{\partial M_H}{\partial x} - UM_H \frac{\partial V}{\partial x} \dots\dots\dots(18)$$

但, M_H ; Const.

ii) 附加質量의 變化量에 기인하는 힘:

$$f_{imp} = \frac{\partial M_H}{\partial t} V \dots\dots\dots(19)$$

但, $M_H(t)$

iii) 造波減衰力:

$$f_r = M_H V \dots\dots\dots(20)$$

iv) 浮力(靜復原力):

$$f_s = \rho g A \dots\dots\dots(21)$$

v) 慣性力:

$$f_i = -\frac{w}{g} (\ddot{\xi} - x\ddot{\theta}) \dots\dots\dots(22)$$

理論 解析

- E : 彈性係數(Young 率)
- G : 剪斷彈性係數
- Δt : 時間간격
- I : 慣性모우멘트

緒 論

海上狀態의 變化에 따라서 船體의 垂直運動振幅이 큰 狀態이거나, 波高가 큰 波가 入射하는 경우에는 線型理論에서는 考慮되지 않는 附加質量의 時間的變化가 크게 생긴다. 때문에, 線型理論의 適用은 不適當하며, 特히 船體의 一部가 水面위로 露出되는 경우에 일어나는 船低衝擊現象에는 非線型解析이 要求된다. 1), 3), 7)

그런데, 그 非線型 影響中에서도 強度上 重要한 考慮要素로, 流體衝擊現象인 slamming 및 그 後에 發生하는 彈性振動인 whipping이 생기고, 이것에 의한 船舶의 損傷例도 가끔씩 報告되고 있으므로 8), 11) 이들을 考慮해서 船體強度를 解析할 必要가 있다.

Slamming에 대한 研究는 線型理論의 運動解析 結果로부터, 6) 다시 運動中의 各 순간에서 變化하는 靜力學的인 힘과 모우멘트, 附加質量 等を 計算하고, 이로부터 다시 船體運動을 解析해서, 이에 따른 船體加速度, 衝擊力 等を 計算하는 研究가 論議되어 왔다. 4), 17)

本論文은 線型理論의 垂直運動方程式으로부터 運動應答과 船體加速度 等を 求한 後, 船體의 垂直運動과 入射波에 의한 相對變位를 求해, 遭遇周期를 等分한 各各의 時刻에 대한 各 斷面의 變化하는 附加質量을 求했다. 이 때 變化하는 임의의 吃水값에 따른 各 斷面의 2次元 附加質量을 求하기 위해서, 船體를 20等分한 21個 斷面에 대해 吃水 變化에 따른 2次元 附加質量을 Frank의 C.F.M.¹⁶⁾에 의해서 求한다. 또, 附加質量의 變化量으로부터, 附加質量의 運動量의 時間에 관한 變化率에 기인하는 衝擊力과 船首露出이 있는 後에 船首部的 船低가 물을 치면서 再突入할 때 發生하는 船體衝擊力의 時間的變化와 船體 길이方向에 대한 分布를 求하였다.

線型理論에서는 취급하지 않는 衝擊力問題, 船體 斷面形狀에 따른 力學的 힘을 考慮하여, 非線型 運動方程式으로부터 各 斷面의 船體加速度의 時間的變化와 船體 中央部에서의 波浪굽힘모우멘트의 時間的變化 등과 같은 船體應答을 有限要素法에 의해서 解析하였다. 9), 10), 11), 14.), 15)

1. 座標系 및 船體運動

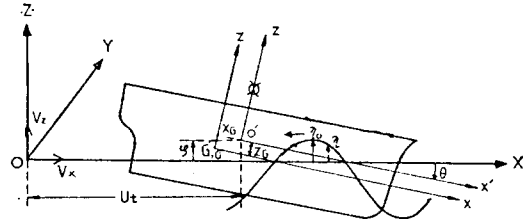


Fig. 1. Coordinate System.

本論文에서는 正面規則波中을 等速度 U로 進行하는 船體에 대하여 Heave와 Pitch만을 考慮하며, Fig. 1의 O-XYZ는 空間固定 座標系를, o'-x'y'z'는 静止自由水面과 Midship에 原點을 둔 座標系를, o-xyz는 船體重心 G에 原點을 둔 座標系를 나타낸다. 또한 各 座標系의 相關關係는 式(1), (2)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} x &= x' - x_G \\ y &= y' \\ z &= z' - z_G \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= (x + x_G)\cos\theta + Ut\cos\theta + (z + z_G)\sin\theta \\ Y &= y \\ Z &= (z + z_G) + \zeta - (x + x_G)\sin\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

Fig. 1에서 波의 入射에 의한 支配方程式과 境界條件은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z^2} &= 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial Z} &= 0 ; Z = -\infty \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \frac{\partial \Phi}{\partial Z} ; Z = 0 \\ \eta &= -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} ; Z = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

上記 條件을 만족하는 -X軸方向으로 進行하는 波의 速度포텐셜은,

$$\Phi = -\frac{g\eta_0}{\omega} e^{\kappa z} \sin(\omega t + \kappa x) \dots\dots\dots(4)$$

가 되고, 入射波의 方程式과 Z方向의 流體粒子의 速는 各各 다음과 같다.

$$\eta = \eta_0 e^{\kappa z} \cos(\omega t + \kappa x) \dots\dots\dots(5)$$

$$V_x = -\eta_0 \omega e^{\kappa z} \sin(\omega t + \kappa x) \dots\dots\dots(6)$$

各各을 o'-x'y'z'의 座標系로 바꾸면 다음과 같다.

$$\Phi = -\frac{g\eta_0}{\omega} e^{\kappa z'} \sin(\omega_e t + \kappa x') \dots\dots\dots(4)'$$

方程式을 定式化할 수 있다.

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} \{\delta(T-V) + \delta D + \delta W\} dt = 0 \dots\dots\dots(39)$$

$$f_v = M_{vv}\ddot{q}_v + M_{vr}\ddot{q}_r + C_{vv}\dot{q}_v + K_{vv}q_v \dots\dots\dots(40)$$

$$f_r = M_{rv}\ddot{q}_v + M_{rr}\ddot{q}_r \dots\dots\dots(41)$$

matrix型으로 쓰면,

$$\begin{pmatrix} M_{vv} & M_{vr} \\ M_{rv} & M_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_v \\ \ddot{q}_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{vv} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_v \\ \dot{q}_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{vv} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_v \\ q_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_v \\ f_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots(42)$$

가 된다.

式(42)는 不安定하기 쉬우므로, 外力中 加速度, 速度, 變位에 比例하는 項을 左邊으로 移項시켜 정리하면, 다음式으로 된다.

$$\begin{pmatrix} M_{vv} + \overset{*}{M}_{vv} & M_{vr} + \overset{*}{M}_{vr} \\ M_{rv} + \overset{*}{M}_{rv} & M_{rr} + \overset{*}{M}_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_v \\ \ddot{q}_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{vv} & C_{vr} \\ 0 & C_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_v \\ \dot{q}_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{vv} + \overset{*}{K}_{vv} & \overset{*}{K}_{vr} \\ \overset{*}{K}_{rv} & \overset{*}{K}_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_v \\ q_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overset{*}{f}_v \\ \overset{*}{f}_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots(43)$$

여기서, *는 流體力에 의한 成分이고, 振動成分의 造波減衰는 대단히 적으므로 $[C_{vv}^*, C_{rr}^*]$ 는 무시한다.

4. 運動方程式의 解

線形加速度法을 一般化시킨 公式의 하나인 Newmark's β 法을 使用하여(式(44), (45)), Step-by-step으로 解를 구한다.

$$\dot{u}(t+\Delta t) = \dot{u}(t) + \Delta t \ddot{u}(t) + \{(\Delta t)^2/2\} \ddot{u}(t) + \beta(\Delta t)^2 \{\ddot{u}(t+\Delta t) - \ddot{u}(t)\} \dots\dots\dots(44)$$

$$\dot{u}(t+\Delta t) = \dot{u}(t) + \Delta t \{\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t+\Delta t)\}/2 \dots\dots\dots(45)$$

本 論文에 適用한 β 값은 Fig. 5에 의해 $\beta = \frac{1}{4}$ 을 취했고, Δt 는 2節上下振動周期의 約 $\frac{1}{300}$ 로 했다.

計算結果 및 考察

Fig. 6은 計算에 使用한 Container-ship의 正面線圖를 나타내고, Table 1은 그 主要치수를 나타내며, 重量分布圖는 Fig. 7과 같다. 數值計算은 Fig. 14의 Flow-chart에 의한 program으로 行하였다.

正面規則波($\alpha=180^\circ$)를 받고, 波高/波長=1/30, 波

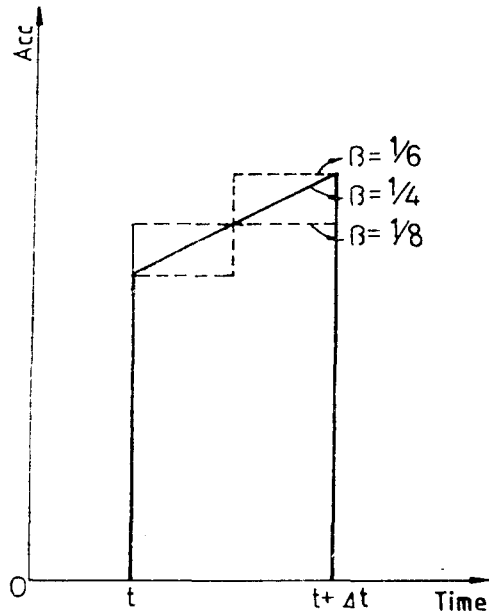


Fig. 5. Values of β for different types of variation of acc.

Table 1. Principal Particulars of Ship

$L_{pp}(m)$	199
$B(m)$	32.2
$D(m)$	18.8
$T(m)$	9.6
$\Delta(\text{ton})$	38, 136.6
L/B	6.18
B/T	3.354
$L_{cb}(\%L_{pp})$	-2.236
C_b	0.615
C_m	0.977

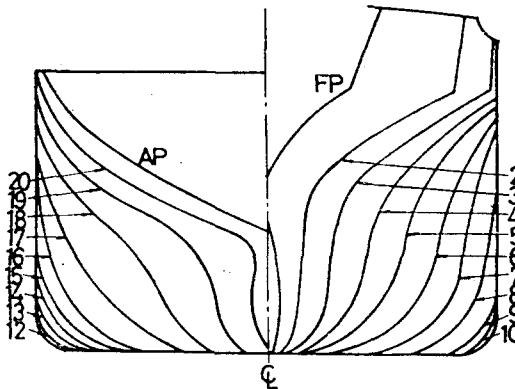


Fig. 6. Lines of Container-ship.

vi) 船體自重:

$$f_g = -mg \dots \dots \dots (23)$$

따라서, 그 船體斷面에 作用하는 힘 f_x 는

$$f_x = f_m + f_{imp} + f_r + f_s + f_i + f_g \dots \dots \dots (24)$$

로 된다.

3. 有限要素法에 의한 定式化^{13), 14), 15)}

式(16), (17)의 運動方程式을 풀기 위하여, 等價에너지를 原理를 使用해서 有限要素法을 適用한다.

式(8)로부터,

$$T = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} m \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx \dots \dots \dots (25)$$

$$V(w, w_s) = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ EI \left(\frac{\partial^2 (w - w_s)}{\partial x^2} \right)^2 + GA_w \left(\frac{\partial w_s}{\partial x} \right)^2 \right\} dx \dots \dots \dots (26)$$

여기서, T , V 는 船體의 運動 및 變形率에너지를 나타내고, 内力 및 外力에 의한 假想일을 각각 δD , δW 라 하면,

$$\delta D = \frac{\delta_2}{\pi \omega_2} \delta V \dots \dots \dots (27)$$

$$\delta w = \int_{-L/2}^{L/2} f_x \cdot \delta w dx \dots \dots \dots (28)$$

로 된다.

다음에 變位の 離散化를 위해, 굽힘變位 w_b 中 周波數依存性을 갖는 剛體運動成分 w_r 과 船體振動成分 w_{bv} 는 別個의 造波減衰係數를 使用해야 하므로, 나누어 생각하면,

$$w_b = w_r + w_{bv} \dots \dots \dots (29)$$

式(8)로부터

$$w = w_b + w_s = w_r + w_{bv} + w_s \dots \dots \dots (30)$$

式(29)에서 $w_{bv} + w_s$ 는 船體의 彈性에 의한 振動成分으로 w_v 라 두면,

$$w = w_r + w_v = [N_r] \{q_r\} + [N_v] \{q_v\} \dots \dots \dots (31)$$

$$w_b = w - w_s = [N_{bv}] \{q_v\} + [N_r] \{q_r\} \dots \dots \dots (32)$$

여기서, $[N]$ 는 形狀函數, $\{q\}$ 는 一般化座標의 變位를 나타낸다.

$$[N_v] = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l} & 1 & 0 & \frac{1}{l} & 0 \\ -\frac{3}{l^2} & \frac{3}{l^2} & -\frac{2}{l} & \frac{3}{l^2} & -\frac{3}{l^2} & \frac{1}{l} \\ \frac{2}{l^3} & -\frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} & -\frac{2}{l^3} & \frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (33)$$

$$[N_s] = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (34)$$

$$[N_r] = \begin{pmatrix} 1 \\ x \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 & -\frac{L}{2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (35)$$

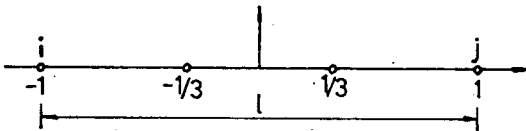
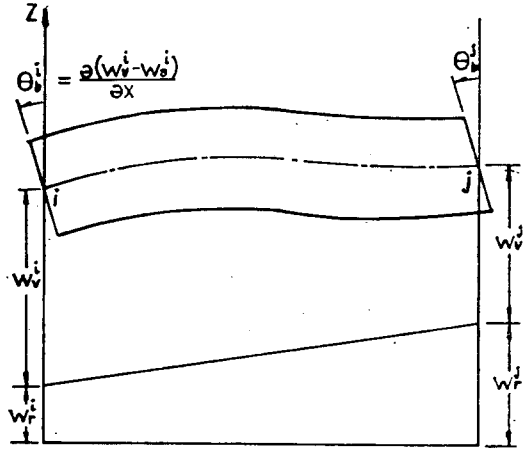


Fig. 4. Nodal point displacement.

또한, Fig. 4에서

$$\{q_v\}^T = \{w_{bv}^i, w_s^i, \theta_b^i, w_{bv}^j, w_s^j, \theta_b^j\} \dots \dots \dots (36)$$

$$\{q_r\}^T = \{z_m, \theta\} \dots \dots \dots (37)$$

이고, 式(35), (37)의 근거는 다음과 같다. 即, 剛體運動은 몇개의 振動 mode의 線型合으로 되지만 單純化시키면,

$$w_r = z_m + \theta \left(x - \frac{L}{2} \right) \dots \dots \dots (38)$$

로 된다.

여기서, z_m 은 Heave量, θ 는 Pitch量이다.

剛體運動의 導入에 의해서 自由度數가 과잉으로 되기 때문에 振動變位를 2點에서 拘束($w_b = 0$), 하고 剪斷變位의 基準線을 定하기 위해서 剪斷變位의 1點을 기준($w_s = 0$)으로 한다.

離散化된 變位를 式(25)~(28)에 代入하고, 다음에 Hamilton의 原理를 使用하면, 다음과 같이 運動

슬래밍 충격을 받는 船體의 動的 應答解析

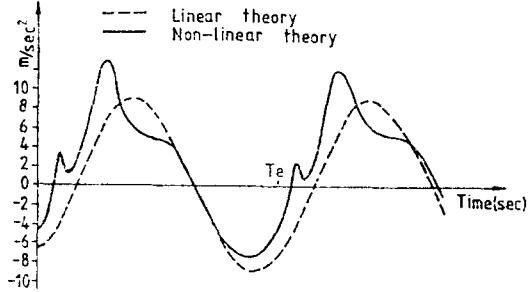


Fig. 12. Time history of Acc. at F.P.
($F_n=0.2$, $h/\lambda=1/30$, $\lambda/L=1.3$)

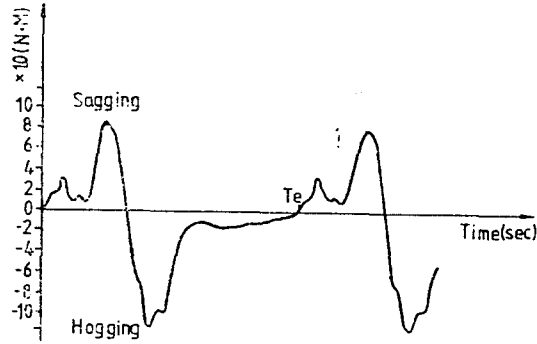


Fig. 13. Time history of B.M. at midship.
($F_n=0.2$, $h/\lambda=1/30$, $\lambda/L=1.3$)

또한, 波高/波長=1/50, 波長/船長=1.3, $F_n=0.2$ 일때의 衝擊力의 Time-history와 이 경우의 S.S.3 斷面에서의 吃水와 相對速度를 各各 Fig. 10과 Fig. 11 에 나타낸다.

Fig. 12 및 Fig. 13에는 $F_n=0.2$, 波高/波長=1/30 波長/船長=1.3인 경우의 船首에서의 加速度의 時間的 變化 및 船體中央部에서의 굽힘모멘트의 時間的 變化를 나타내며, 船底衝擊이 作用하는 순간에 약간의 갑작스러운 增加를 보이나, 最大値를 갖는 부근에서 전체적으로 加速度의 增加가 나타남을 알 수 있다.

結 論

1. 正面規則波中에서 Bow-flare部 衝擊은 船底衝擊에 比해서 作用 時間이 길고, 船體 垂直運動振幅이 큰 狀態이거나, 波高가 큰 入射波가 適用되는 경우 船體에 作用하는 衝擊力은 상당히 크며, 波高가 높아지면, 發生하는 모멘트도 增加한다.

2. Bow-flare 部가 큰 船型의 경우에는 船底露出이 일어나지 않더라도 附加質量의 급격한 增加에 따라 상당히 큰 衝擊力이 作用한다.
3. Deckwetness, 不規則波中에서의 應答解析, 相對變位를 求할 때 Dynamic Swell-up의 量을 考慮한 計算等의 檢討가 要望된다.

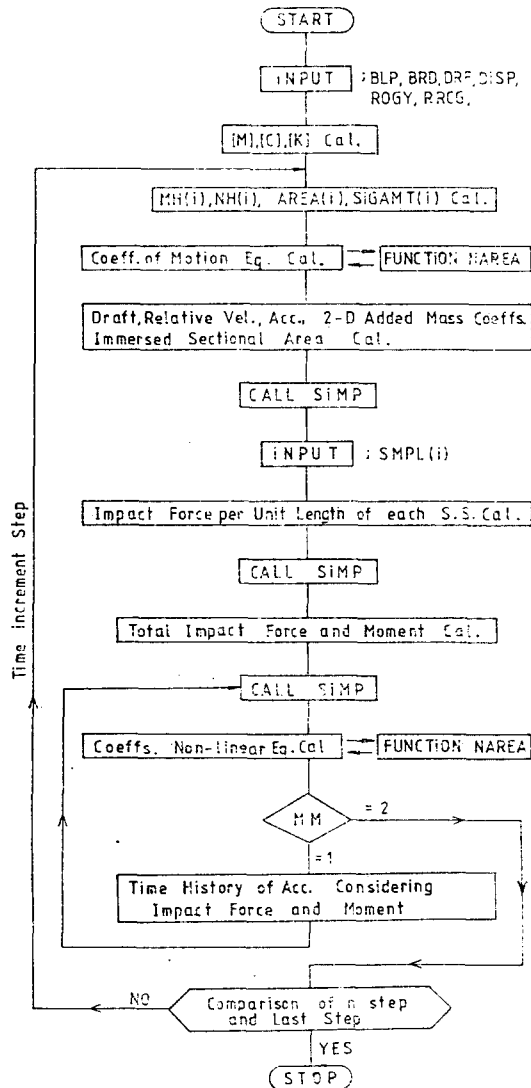


Fig. 14 Flow chart.

謝 辭

본 논문은 연구에 자료제공 및 많은 도움을 주신 부산대학교 김사수교수님께 감사를 드립니다.

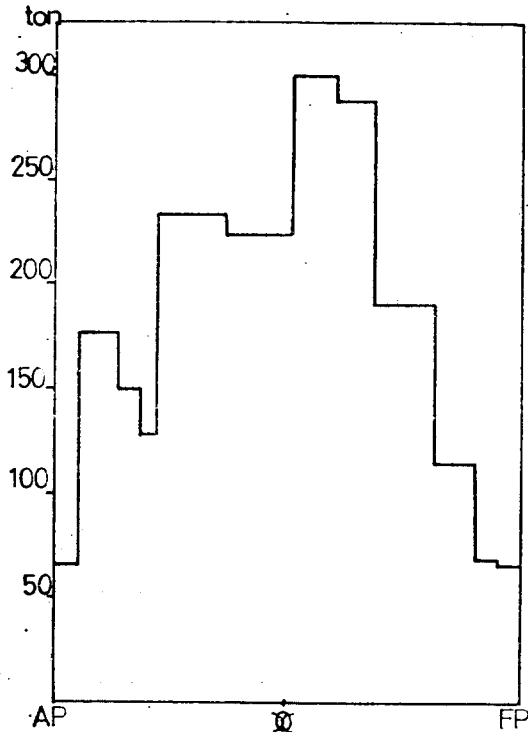


Fig. 7. Weight curves.

長/船長=1.3, $F_n=0.2$ 일 때의 衝擊力의 Time-history와 이 경우의 S.S.3 斷面에서의 吃水와 相對速度를 各各 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내고 있으며, S.S.3 斷面に 作用하는 衝擊力의 變化를 보면, 플레어 衝擊이 船底衝擊보다 큰을 알 수 있고, S.S.4, 5 斷面에서는 船底衝擊이 크게 나타난다. 그리고 이때의 衝擊力은 相對速度의 크기, 吃水의 變化率, 即, 附加質量의 變化率에 큰 影響을 받는다.

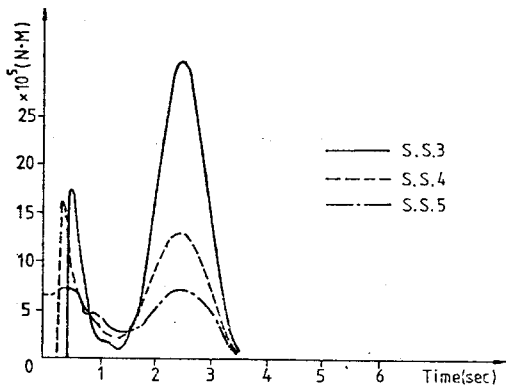


Fig. 8. Time history of impact force.
($F_n=0.2$, $h/\lambda=1/30$, $\lambda/L=1.3$)

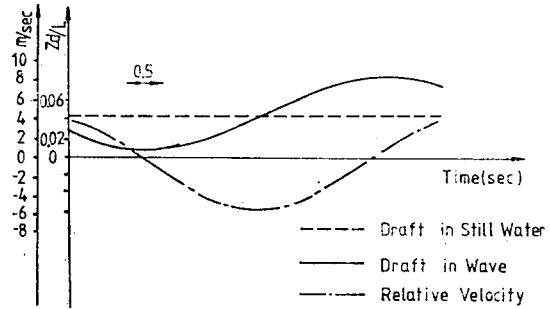


Fig. 11. Time history of draft and relative velocity at S.S. 3.
($F_n=0.2$, $h/\lambda=1/50$, $\lambda/L=1.3$)

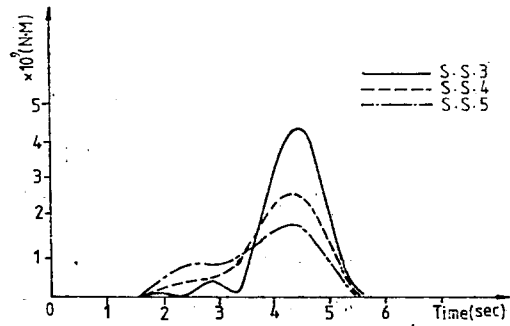


Fig. 10. Time history of impact force.
($F_n=0.2$, $h/\lambda=1/50$, $\lambda/L=1.3$)

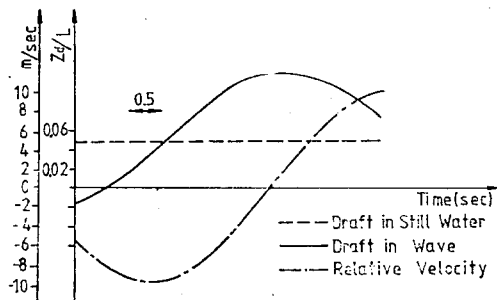


Fig. 9. Time history of draft and relative velocity at S.S. 3.
($F_n=0.2$, $h/\lambda=1/30$, $\lambda/L=1.3$)